

4.1. POMIAR NATĘŻENIA PRZEPŁYWU

Natężenie przepływu jest to ilość wody przepływająca przez dany przekrój poprzeczny koryta rzecznego w jednostce czasu. Jest to jedna z najważniejszych charakterystyk hydrologicznych, gdyż pozwala na obliczenie całkowitej objętości wody, która odpływa ze zlewni. Istnieją bezpośrednie i pośrednie metody pomiaru natężenia przepływu. Wybór metody zależy głównie od rodzaju i wielkości cieku oraz od różnorodności warunków przepływu wody, a także od dostępnej aparatury pomiarowej i wymaganej dokładności wyników. Pomiary bezpośrednie dają możliwość szybkiej oceny natężenia przepływu małych cieków i wypływów, natomiast metody pośrednie – wymagające przyrządów hydrometrycznych do pomiaru prędkości przepływu wody w korycie – są nieco bardziej skomplikowane.

4.1.1. Metody bezpośrednie

Do metod bezpośrednich należą metody: wolumetryczna, chemiczna oraz przelewów cechowanych. **Metoda wolumetryczna**, zwana inaczej metodą podstawionego naczynia lub objętościową, służy do pomiaru natężenia przepływu w małych ciekach oraz wydajności niewielkich źródeł. Polega ona na bezpośrednim pomiarze ilości przepływającej wody za pomocą naczynia o znanej pojemności. Jest metodą dokładną, przy założeniu, że stosuje się ją w warunkach, gdzie istnieje możliwość całościowego uchwycenia strumienia przepływającej wody. Nadaje się do pomiaru natężenia przepływu nie większego niż $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pomiar należy powtórzyć co najmniej trzykrotnie, a wynik uśrednić. Natężenie przepływu oblicza się według wzoru:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.1.1)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- V – objętość wody w podstawionym naczyniu [dm^3],
- t – średni czas napełnienia naczynia [s].

Jedną z **metod chemicznych** jest metoda konduktometryczna z jednorazowym dozowaniem substancji wskaźnikowej. Służy ona do badania rzek o turbulentnym przepływie wody, gdzie możliwe jest dobre wymieszanie substancji wskaźnikowej, której rolę pełni zazwyczaj roztwór chemiczny soli kuchennej (NaCl). Metodę tę można stosować do pomiaru natężenia przepływu rzek, w których



Wybór metody pomiaru natężenia przepływu zależy m.in. od wielkości koryta i sposobu przepływu wody



Metody chemiczne stosuje się do pomiaru natężenia przepływu w rzekach o turbulentnym (burzliwym) ruchu wody

przepływ turbulentny – ruch wody o charakterze burzliwym; w korytach otwartych występuje, gdy Re ma wartość większą niż 5000, zaś w ośrodku porowatym większą niż 10

liczba Reynoldsa (Re) – liczba bezwymiarowa wyrażająca stosunek sił bezwładności do sił lepkości działających w cieczy będącej w ruchu

przepływ nie jest większy niż kilkanaście metrów sześciennych na sekundę.

Przed przystąpieniem do pomiaru, należy zbadać bieg rzeki i wyznaczyć odpowiednie miejsce do jednorazowego wprowadzenia roztworu pierwotnego do rzeki oraz profil kontrolny, oddalony od tego miejsca na tyle, aby na wyznaczonym odcinku nastąpiło pełne wymieszanie roztworu z wodą rzeczną. Długość odcinka mieszania najlepiej wyznaczyć za pomocą barwnika, np. fluoresceiny. Odległość między punktem wiania roztworu pierwotnego a profilem kontrolnym powinna być 2–3 razy większa niż długość odcinka mieszania.

Pomiar polega na jednorazowym wprowadzeniu do ciekłu roztworu pierwotnego oraz badaniu w wodzie rzecznej zmian stężenia roztworu, wyrażonej przewodnictwem elektrycznym SEC , mierzonym za pomocą konduktometru. Roztwór pierwotny ulega w wodzie rzecznej wymieszaniu. W profilu kontrolnym mierzy się przewodnictwo elektryczne w ustalonych odstępach czasu. Początkowo stężenie wprowadzonego roztworu jest słabe, następnie szybko narasta i ponownie słabnie. Przepływ Q oblicza się na podstawie wykresu „fali roztworu”, przedstawiającego zmiany stężenia względniego w profilu kontrolnym. Stosuje się przy tym wzór:

$$Q = \frac{V}{kA} \quad (4.1.2)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- V – objętość porcji roztworu pierwotnego wlanego do rzeki [dm^3],
- A – powierzchnia zawarta między wykresem „fali roztworu” a jej podstawą [cm^2],
- k – podziałka wykresu (obliczona jako iloczyn wartości stężenia roztworu odpowiadającej 1 cm na osi rzędnych i wartości czasu [s] odpowiadającej 1 cm na osi odciętych).

Sposób pomiaru

Do wykonania pomiaru natężenia przepływu metodą konduktometryczną potrzebna jest dwu- trzysobowa ekipa z następującym sprzętem: konduktometr, stoper, menzurka o pojemności 1 dm^3 , sól kuchenna (NaCl), fluoresceina, pipeta do poboru roztworu soli, jedno duże i dwa małe plastikowe wiadra. Przed przystąpieniem do pomiaru należy kilkakrotnie sprawdzić, czy przewodnictwo wody rzecznej wykazuje stały poziom, i w ten sposób ocenić tło. Jeśli zmiany przewodnictwa wykraczają poza skalę dokładności przyrządu, metoda ta nie może być zastosowana. Jeżeli istnieje prawdopodobieństwo, iż w czasie pomiaru przewodnictwo elektryczne

wody może się zmienić (np. z powodu zrzutu ścieków), należy podczas trwania pomiaru – powyżej miejsca wiania roztworu – sprawdzać przewodnictwo elektryczne wody rzecznej (tło), aby być pewnym, iż podczas pomiaru nie uległo ono zmianie.

1. Sporządzenie roztworu pierwotnego NaCl

Roztwór należy sporządzić w małym wiadrze wypłukanym wodą rzeczną. Do wiadra wlewa się określoną ilość wody rzecznej oraz dodaje NaCl, a następnie dobrze miesza. Ilość roztworu jest zależna od wielkości przepływu i czasu mieszania roztworu w rzece: na $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ przepływu sporządza się od 25 do 75 dm^3 roztworu o stężeniu 20% (200 g soli kuchennej na 1 dm^3 wody rzecznej).

2. Sporządzenie roztworu wtórnego

Dla potrzeb kalibracji roztworu pierwotnego należy przygotować rozcieńczony roztwór wtórny, w którym jako rozcieńczalnik najwygodniej użyć również wodę z rzeki, w której wykonuje się pomiar. Nie jest wymagana znajomość absolutnego stężenia roztworu wtórnego, lecz jego stężenie względne, które oblicza się według wzoru:

$$S_{wr} = \frac{V_p}{V_w + V_p} \quad (4.1.3)$$

gdzie:

S_{wr} – stężenie względne roztworu wtórnego,

V_p – objętość roztworu pierwotnego (roztworu soli przygotowanego do wiania do rzeki),

V_w – objętość rozpuszczalnika, czyli wody rzecznej (jednostki V_p i V_w muszą być takie same).

Przyjmuje się, że stężenie względne wody rzecznej jest równe 0, natomiast roztworu pierwotnego wynosi 1. Aby zatem sporządzić roztwór wtórny, do 990 cm^3 wody rzecznej, pobranej do małego plastikowego wiadra, należy dodać 10 cm^3 roztworu pierwotnego. Tak przygotowany roztwór ma stężenie względne 0,01 (wg wzoru 4.1.3). Najwygodniej stosować roztwór wtórny o stężeniu 0,1 (do 900 cm^3 wody rzecznej dodać 100 cm^3 roztworu pierwotnego). Wiaderko z roztworem wtórnym należy włożyć do rzeki, aby roztwór utrzymywał temperaturę wody rzecznej (jeśli stosowany konduktometr nie posiada automatycznej kompensacji temperatury).

3. Jednorazowe wlanie roztworu do rzeki

Przed wlaniem roztworu pierwotnego należy zmierzyć naturalną przewodność wody w rzece. Następnie, w miejscu uprzednio wyznaczonym, wlewa się roztwór jednorazowo i szybko. Roztwór powinien wymieszać się z wodą rzeczną między miejscem wiania a profilem kontrolnym.



Wlanie roztworu pierwotnego do rzeki



Pobór prób wody w równych odstępach czasu

Tab. 4.1.1. Wzór tabeli do zestawienia wyników pomiaru przewodnictwa SEC

4. Pomiar przewodnictwa elektrycznego

Pomiar należy wykonywać w uprzednio wyznaczonym profilu kontrolnym i rozpocząć w momencie wzrostu przewodnictwa. Częstotliwość pomiarów w profilu (co 10, 20, 30 s.) zależy od szybkości i stopnia mieszania się roztworu z wodą rzeczną oraz prędkości płynięcia wody. Istotne jest, aby uchwycić maksimum stężenia roztworu w rzece. Jeśli roztwór miesza się szybko, a prędkość przepływu wody w rzece jest duża, pomiary należy wykonywać częściej, np. co 5 s. Gdy tempo zmian stężenia spadnie, interwały czasowe można wydłużyć. Pomiar prowadzi się do momentu powrotu przewodnictwa do poziomu wyjściowego (sprzed wiania do rzeki roztworu pierwotnego). Wyniki najlepiej zestawiać w tabeli wraz z dodatkowymi informacjami (tab. 4.1.1).

Data: Rzeka: Stanowisko:
 Temperatura wody w rzece: °C
 Objętość roztworu pierwotnego V_p wianego do rzeki: dm³

Czas [s]	SEC [μS · cm ⁻¹]

W rzekach o silnej turbulencji występują pęcherzyki powietrza, mogące wywołać wahania wskazań elektrody. W takiej sytuacji, pomiary przewodnictwa należy wykonywać w rynience o stałym, równomiernym przepływie wody dostarczanej z rzeki za pomocą elastycznego węża z tworzywa sztucznego. Można także, w określonych odstępach czasu, pobierać próby wody z rzeki i na brzegu mierzyć ich przewodnictwo.

Jeśli temperatura wody znacznie różni się od temperatury powietrza, istotnym źródłem błędów mogą być zmiany temperatury wody w trakcie pomiarów. Należy wówczas wprowadzić odpowiednie poprawki według zaleceń opisanych w książce *Metody hydrochemiczne w geomorfologii dynamicznej* (Kostrzewski, Pulina red.: 1992; patrz: Literatura podstawowa). Uwaga ta nie dotyczy konduktometrów posiadających automatyczną kompensację temperatury.

5. Sporządzenie roztworu do kalibracji

Z rzeki należy pobrać od 0,5 do 1 dm³ wody do małego plastikowego wiadra, wypłukanego uprzednio wodą rzeczną. Następnie, za pomocą pipety, dodawać dawki roztworu wtórnego i starannie mieszać oraz każdorazowo mierzyć przewodnictwo, aż

do momentu, gdy osiągnie ono maksymalny poziom zanotowany w rzece (jeżeli stosowano dwudziestoprocentowy roztwór pierwotny i roztwór wtórny o stężeniu względnym 0,1 oraz pobrano z rzeki do kalibracji 1 dm³ wody, to w zależności od wielkości zmian przewodnictwa w rzece podczas pomiaru, wielkość dawek roztworu wtórnego może wynosić 0,5, 1 lub 2 cm³). Takich pomiarów nie powinno być mniej niż siedem; im jest ich więcej, tym kalibracja będzie dokładniejsza. Jeśli konduktometr nie posiada automatycznej kompensacji temperatury, należy dopilnować, aby próba wody użyta do kalibracji miała taką samą temperaturę jak woda w cieku w czasie pomiaru. Wyniki należy zestawić w tabeli 4.1.2 wraz z dodatkowymi informacjami.

<i>Stężenie względne „roztworu wtórnego” S_w -</i> <i>Objętość wody rzecznej użytej do kalibracji V_k - dm³</i> <i>Temperatura próby przed kalibracją °C; po kalibracji °C</i>			
Objętość dodanego roztworu V_r [cm ³]	Stężenie względne S_w	Przewodność elektryczna SEC [μS · cm ⁻¹]	Skorygowana przewodność elektryczna SEC_k [μS · cm ⁻¹]
1	2	3	4

Tab. 4.1.2. Kalibracja zmian przewodności

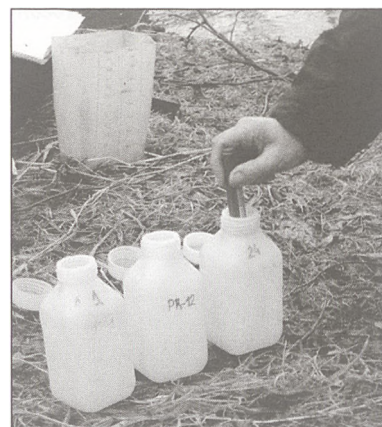
Wszystkie naczynia laboratoryjne, a wśród nich także pipeta, kalibrowane są dla wody destylowanej o temperaturze 20°C. Ze względu na inną lepkość i gęstość roztworu soli, należy wprowadzić poprawkę odczytu objętości według wskazań pipety. Błąd pomiaru objętości za pomocą pipet można skorygować według wzoru:

$$V_r = \frac{V - k}{25} c \quad (4.1.4)$$

gdzie:

- V_r – rzeczywista objętość roztworu soli zmierzona pipetą,
- V – nominalna pojemność pipety,
- k – stała zależna od typu pipety (dla pipety 10 cm³ $k = 0,015$, a dla pipety 25 cm³ $k = 0,017$),
- c – stężenie roztworu soli [%].

W zależności od typu pipety oraz stężenia soli, błąd związany z lepkością wynosi od 0,01 do 1% jej nominalnej pojemności. W przypadku rozcieńczonych roztworów wtórnych, nie przekracza on zazwyczaj 0,1%, można więc go pominąć. Jego znaczenie jednak rośnie, jeśli wykonujemy pomiar w rzekach o temperaturze bliskiej 0°C (np. rzeki glacialne, proniwalne).



Pomiar przewodnictwa elektrycznego



Wykreślanie krzywej kalibracji i „fali roztworu”

Stężenie względne w tym przypadku oblicza się według wzoru:

$$S_w = \frac{V_{rw} S_{wr}}{V_{rk} + V_{rw}} \quad (4.1.5)$$

gdzie:

S_w – stężenie względne,

V_{rw} – objętość roztworu wtórnego dodawanego pipetą w celu kalibracji,

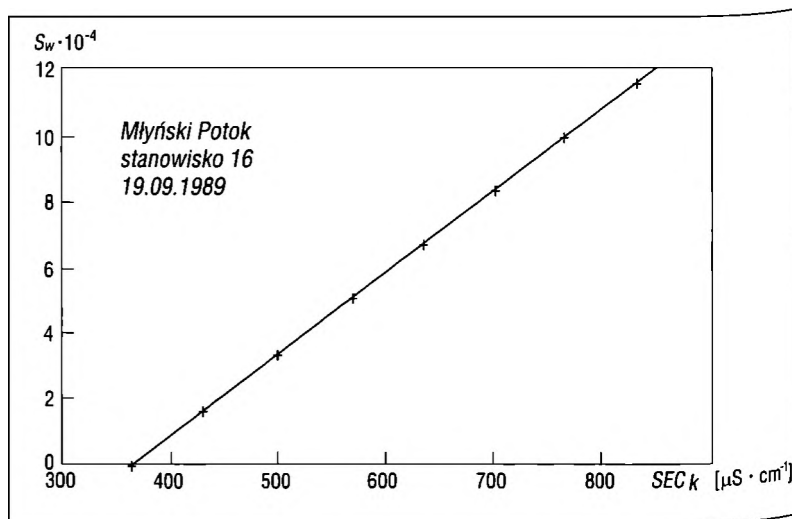
S_{wr} – stężenie względne roztworu wtórnego,

V_{rk} – objętość wody rzecznej użytej do kalibracji (jednostki V_{rw} i V_{rk} muszą być takie same).

W praktyce zdarza się, że wyjściowa przewodność próby pobranej do kalibracji różni się od przewodności naturalnej w rzece. Może to wynikać zarówno z różnic temperatury oraz odmiennych warunków elektrochemicznych panujących w wiaderku, jak również zależy od dokładności przyrządu i błędu odczytu. Ze względu na tę różnicę, do obliczeń należy przyjąć skorygowane wartości przewodności SEC_k . Na przykład, jeżeli przewodność naturalna wody w rzece wynosi $200 \mu S$, a przewodność próby pobranej do kalibracji $205 \mu S$, to od każdej wartości zmierzonej w trakcie kalibracji należy odjąć $5 \mu S$.

6. Wykreślenie krzywej kalibracji

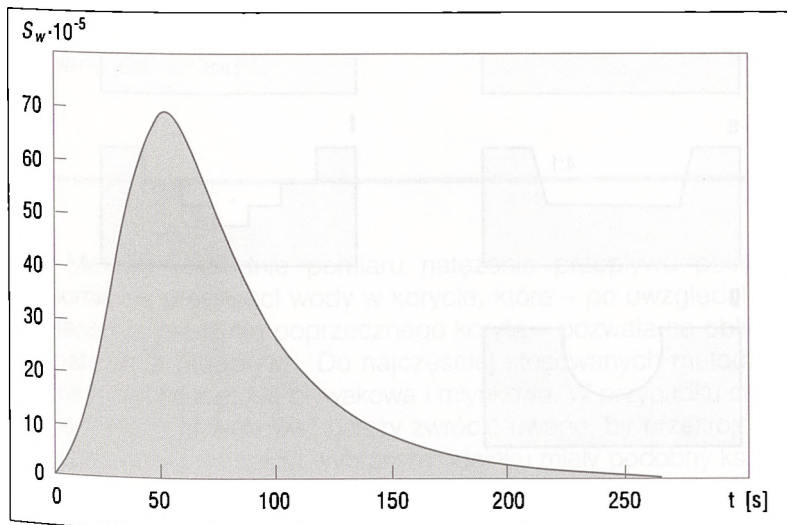
Krzywa kalibracji przedstawia zależność między przewodnictwem elektrycznym SEC_k (oś X) a stężeniem względnym S_w (oś Y; ryc. 4.1.1; odpowiednio kolumny 4 i 2, tab. 4.1.2). Wykres najlepiej narysować na papierze milimetrowym. Zależność między przewodnictwem a stężeniem względnym warto wyrazić za pomocą równania regresji.



Ryc. 4.1.1. Przykład krzywej kalibracji
(Młyński Potok, 19 IX 1989 r.)
(Kostrzewski, Pulina; 1992)

7. Sporządzenie wykresu „fali roztworu”

Wykres sporządza się na podstawie pomiarów przewodnictwa w profilu kontrolnym. Na osi odciętych zaznacza się czas t [s], natomiast na osi rzędnych – stężenie względne S_w (odczytane z krzywej kalibracji), odpowiadające zmierzonemu przewodnictwu elektrycznemu zanotowanemu w tab. 4.1.1 (ryc. 4.1.2). Stężenie względne odczytuje się z krzywej kalibracji wykreślonej wcześniej (patrz: punkt 6). Pole pod wykresem należy splanimetrować.

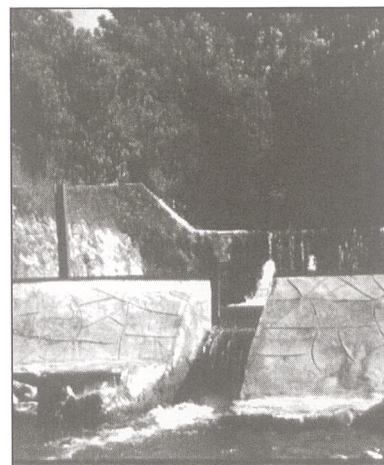


Ryc. 4.1.2. „Fala roztworu”
(Młyński Potok, 19 IX 1989 r.)
(Kostrzewski, Pulina; 1992)

8. Obliczenie wielkości przepływu

Aby obliczyć przepływ, należy zastosować wzór (4.1.2). Algorytm obliczeniowy metody chemicznej napisany w Turbo Basic dla komputerów klasy PC zawarty jest w książce *Metody hydrochemiczne w geomorfologii dynamicznej* (Kostrzewski A., Pulina M., red.; 1992; patrz: Literatura).

W **metodzie przelewów cechowanych**, do pomiarów natężenia przepływu wykorzystuje się istniejące urządzenia przelewowe przy budowach wodnych (progi, zastawki, jazy) lub instaluje się specjalne przelewy pomiarowe. Ze względu na kształt otworu w przelewie wyróżnia się przelewy prostokątne (Bazina – ścianka piętrząca na całej szerokości koryta; Ponceleta – prostokątny otwór w środkowej części ścianki), trójkątne, trapezowe, kołowe i złożone (ryc. 4.1.3). Szczególnym przypadkiem przelewów trójkątnych jest przelew Thomsona zaopatrzony w wycięcie o kącie rozwarcia 90° . Ze względu na zmienność przepływów, często stosuje się przelewy o kształtach złożonych, tak by przy jak najwyższej dokładności pomiaru zakres mierzonych przepływów był dostatecznie duży. Wykorzystuje się zwykle przelewy trójkątne o różnych kątach rozwarcia: od niewielkich

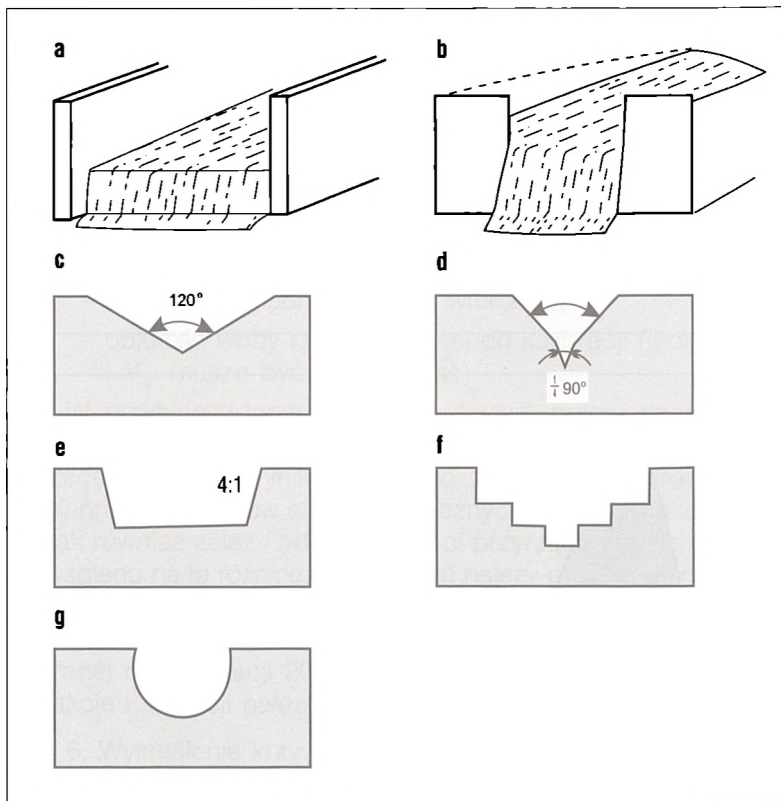


Koryto rzeczne z przelewami prostokątnym i trapezowym



Pomiar natężenia przepływu przelewem trójkątnym

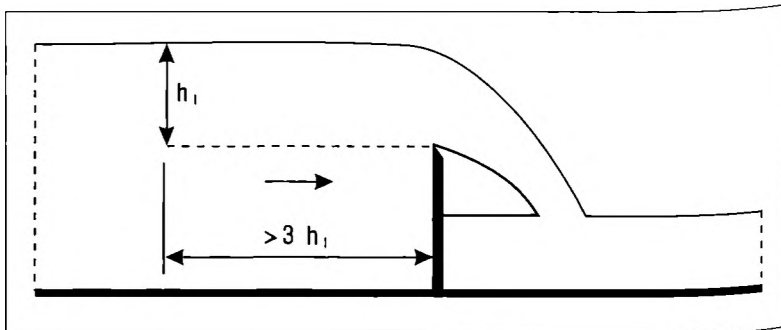
Ryc. 4.1.3. Przelewy: a – prostokątny (Bazina), b – prostokątny ze zwężeniem bocznym (Ponceleta), c – trójkątny, d – trójkątny złożony, e – trapezowy (Cipolettiego), f – złożony prostokątny, g – półkolisty



w dolnej części ścianki (do pomiarów niewielkich przepływów) do dużych – w górnej części ścianki (do pomiarów znacznych przepływów).

Pomiar natężenia przepływu za pomocą przelewu polega na określeniu grubości warstwy wody h przelewającej się nad koroną przelewu. Pomiary wykonuje się w odległości 3–4 h w górę korony przelewu (ryc. 4.1.4). Aby obliczyć przepływ, stosuje się odpowiednie wzory sformułowane dla różnych typów przelewów. Pełny opis procedury pomiarowej i obliczeniowej można znaleźć m.in. w podręczniku *Metody hydrometrii rzecznej* (Paślawski, 1973).

Ryc. 4.1.4. Sposób pomiaru wysokości warstwy wody przy pomiarze natężenia przepływu przelewem



W terenie, do określania przepływów małych cieków lub wydajności źródeł, stosuje się przelewy przenośne wykonane najczęściej z blachy. Umieszczając je w przekroju pomiarowym, należy zwrócić uwagę, aby piętrzenie nie było zbyt duże oraz by przelew nie był zatopiony. Koryto cieków powinno być uszczelnione (glina, il, darń). Pomiar można rozpocząć, gdy ustabilizuje się przepływ wody przez gardziel przelewu.

Zakres pomiarów przepływu za pomocą przelewów jest duży i wynosi od ułamków litra na sekundę do kilkuset litrów na sekundę. Przelewami o złożonych kształtach można mierzyć przepływy o natężeniu nawet do kilkunastu m^3 na sekundę. Błąd pomiarowy oceniany jest na 1–3%.

4.1.2. Metody pośrednie

Metody pośrednie pomiaru natężenia przepływu polegają na pomiarze prędkości wody w korycie, która – po uwzględnieniu powierzchni przekroju poprzecznego koryta – pozwala na obliczenie natężenia przepływu. Do najczęściej stosowanych metod pośrednich należą metoda pływakowa i młynkowa. W przypadku stosowania metody pływakowej, należy zwrócić uwagę, by przekroje poprzeczne koryta na całym wybranym odcinku miały podobny kształt.

Aby wyznaczyć **powierzchnię przekroju koryta**, należy w wybranym przekroju poprzecznym koryta wykonać sondowanie dna. W tym celu rozciąga się taśmę mierniczą (na dużych rzekach – wycechowaną linę stalową) w poprzek koryta, prostopadle do kierunku płynięcia wody, i – w zależności od szerokości i kształtu koryta – przeprowadza się pomiar głębokości w kilku lub kilkunastu punktach, rozpoczynając od lewego brzegu rzeki. Teoretycznie, odległość między punktami pomiaru głębokości powinna wynosić przeciętnie $1/20$ – $1/30$ szerokości cieku. W praktyce – powinna być ona uzależniona od konfiguracji dna (należy uchwycić wszelkie nierówności dna koryta) oraz od rozkładu prędkości strug wody. Przy pomiarze należy wyraźnie rozgraniczyć przekrój czynny koryta cieku od przekroju nieczynnego (np. przybrzeżne zastoiska).

Sondowanie dna koryta należy wykonać za pomocą wycechowanej tyczki, a głębokość określić z dokładnością do 1 cm.

Na przykład:

Odległość od lewego brzegu [m]	0	0,50	1,00	1,50
Głębokość [m]	0,00	0,42	0,67	1,00

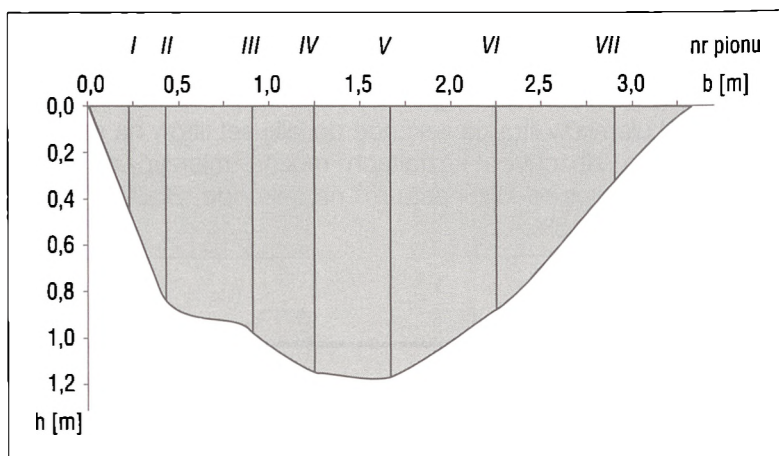
W celu wykreślenia przekroju poprzecznego koryta rzeki należy nanieść zmierzone wartości na wykres (ryc. 4.1.5). Planimetrując



Sondowanie dna w celu wyznaczenia powierzchni przekroju poprzecznego koryta

powierzchnię między linią wyznaczającą poziom wody a linią określającą dno koryta, a następnie mnożąc wynik pomiaru przez podziałkę rysunku, otrzymuje się rzeczywistą wielkość przekroju poprzecznego koryta w m².

Ryc. 4.1.5. Przekrój poprzeczny koryta z zaznaczonymi pionami hydrometrycznymi



Dysponując przekrojem poprzecznym koryta rzeki, można zastosować **metodę pływakową**, która stosowana jest do badania rzek o ruchu wody zbliżonym do laminarnego. Pływakiem mierzy się powierzchniową prędkość wody. Do pomiaru należy stosować naturalne pływaki swobodne, łatwo dostrzegalne, np. kawałki drewnienek o ciężarze właściwym mniejszym od ciężaru właściwego wody i tak dobrane, aby prędkość ich płynięcia jak najmniej różniła się od prędkości wody.

W celu przeprowadzenia pomiaru należy wyznaczyć w miarę możliwości prosty odcinek cieku, którego długość l [m] powinna być 4–5 razy większa od szerokości cieku, np. w cieku o szerokości 2 m – długość odcinka pomiarowego powinna wynosić 10 m. Przekroje krańcowe należy oznaczyć – np. linką przeciągniętą w poprzek cieku, a następnie dokonać kilku pomiarów czasu t [s] płynięcia pływaków na wybranym odcinku; po czym należy obliczyć średni czas przepływu. Liczba pomiarów zależy m.in. od szerokości cieku oraz od warunków płynięcia wody.

Średnią prędkość powierzchniową oblicza się według wzoru:

$$v = \frac{l}{t} \quad (4.1.6)$$

gdzie:

- v – średnia prędkość powierzchniowa wody [m·s⁻¹],
- l – długość odcinka pomiarowego [m],
- t – średni czas płynięcia pływaków [s].

przepływ laminarny – ruch cieczy, w którym przeważają siły lepkości; cząsteczki wody poruszają się w przybliżeniu po równoległych trajektoriach, bez znacznych ruchów poprzecznych; w korytach otwartych zachodzi, gdy Re jest mniejsza niż 500–2000, zaś w ośrodku porowatym, gdy Re jest mniejsza niż 1–10

W praktyce – często nie ma możliwości pomiaru prędkości w różnych częściach cieku, dlatego też pomiar wykonany w nurcie rzeki określa maksymalną prędkość przepływu.

Prędkość powierzchniowa różni się od prędkości wody w pionie i przy dnie koryta cieku. Dlatego też, w celu obliczenia średniej prędkości wody w korycie, należy zastosować współczynnik redukcyjny, uwzględniający szorstkość koryta, która zależy od jego charakteru i głębokości cieku (tab. 4.1.3).

Rodzaj materiału korytowego	Średnica ziaren [cm]	Współczynnik redukcyjny
Kamienie – otoczaki	10–20	0,82–0,84
Kamienie	5–10	0,85–0,87
Żwiry	2–5	0,88–0,89
Piaski	2	0,89–0,90
Muły	2	0,91–0,92

Tab. 4.1.3. Wartości współczynnika redukcyjnego do pomiaru pływakowego (wg IMGW)

Natężenie przepływu wody w przekroju koryta rzeczno oblicza się według wzoru:

$$Q = F v a \quad (4.1.7)$$

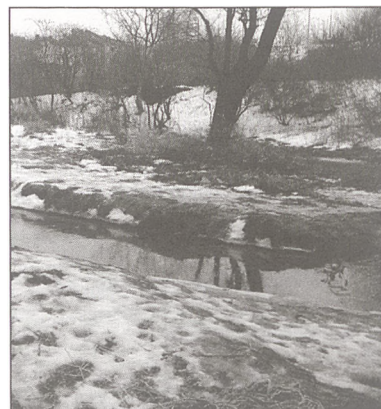
gdzie:

- Q – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- F – powierzchnia przekroju koryta [m^2],
- v – prędkość powierzchniowa wody [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- a – współczynnik redukcyjny.

W rzekach o szerokim korycie należy przeprowadzić pomiar prędkości w kilku miejscach przekroju hydrometrycznego: zarówno w nurcie rzeki, jak i przy brzegach. W celu dokładniejszych obliczeń przepływu należy zastosować procedurę podobną jak w metodzie młynkowej. W miejscach płynięcia kolejnych pływaków wyznacza się kilka pionów pomiaru prędkości, które należy zaznaczyć na wykresie przekroju poprzecznego koryta (patrz ryc. 4.1.5). W raportarzu pomiaru wpisuje się odległość pionu od zera taśmy mierniczej, głębokość w pionie oraz prędkość powierzchniową zmierzoną pływakiem. Następnie należy obliczyć odległość między pionami, średnie głębokości w polach zamkniętych pionami oraz powierzchniowe prędkości średnie w tych polach.

Przepływy cząstkowe ΔQ oblicza się jako iloczyn powierzchni cząstkowych ΔF oraz powierzchniowych średnich prędkości płynięcia wody v_s . Suma przepływów cząstkowych daje wartość przepływu całkowitego. Aby otrzymać rzeczywistą jego wartość, należy obliczony przepływ pomnożyć przez współczynnik redukcyjny (tab. 4.1.3).

Metoda młynkowa polega na punktowych pomiarach prędkości wody za pomocą młynka hydrometrycznego. Pomiar polega na



W rzekach o spokojnym ruchu wody można stosować metodę pływakową



Łączenie elementów składowych młynka hydrometrycznego

rejestracji liczby obrotów wirnika osadzonego na osi (tzw. skrzydełka), poruszanego przez płynącą wodę w określonym czasie. W zależności od warunków przepływu, wielkości i głębokości cieków, stosuje się różne rodzaje młynków, różniące się wymiarami, kształtem lub sposobem umocowania podczas pomiarów (na drążku lub wyciągu). Młynki uniwersalne są wyposażone w ster kierujący, umożliwiający ustawienie młynka równolegle do strug wody. Każdy typ młynka ma laboratoryjnie określone współczynniki tarowania.

Pomiary młynkiem wykonuje się w profilach, w których charakter koryta rzeki jest reprezentatywny dla dostatecznie długiego odcinka rzeki. Jednocześnie, wybór miejsca powinien być uwarunkowany dogodnym dojściem do koryta cieków oraz możliwościami instalacji urządzeń pomiarowych. Profil powinien znajdować się z dala od urządzeń zakłócających równomierność przepływu, takich jak: jazy, śluzy, filary mostowe. Koryto powinno posiadać wyrównane dno, regularny profil i być stabilne. W przekroju pomiarowym wykonuje się sondowanie dna i na tej podstawie wykreśla przekrój poprzeczny koryta. Sposób wykonania pomiarów zależy od głębokości cieków i prędkości wody; do głębokości 0,7 m można je zwykle wykonać stojąc w wodzie, a w głębszych rzekach – z mostu lub kładki, łodzi lub pontonu, z obiektów pływających lub ze specjalnie instalowanych kolejek linowych.

Pomiary prędkości wody wykonuje się w wielu punktach przekroju poprzecznego, wzdłuż pionów hydrometrycznych. Pomiary takie umożliwiają określenie prędkości w poszczególnych punktach przekroju, a następnie obliczenie prędkości średnich w pionach oraz w całym przekroju poprzecznym koryta. Przy rozmieszczeniu pionów hydrometrycznych w przekroju pomiarowym uwzględnić należy m.in. szerokość rzeki, kształt dna koryta, rozkład strug płynącej wody. Minimalna liczba pionów, w zależności od szerokości rzeki, powinna spełniać warunki przedstawione w tabeli 4.1.4. Piony hydrometryczne wyznacza się, w miarę możliwości technicznych, w punktach charakterystycznych załamania dna (najgłębszych i najpłytszych), w miejscach wyraźnych zmian prędkości wody, w nurcie rzeki. Piony skrajne powinny znajdować się możliwie najbliżej brzegów.

Rozmieszczenie punktów pomiarowych w pionie hydrometrycznym zależy od głębokości rzeki h oraz od warunków przepływu. Przy swobodnym przepływie, niezakłóconym przez zjawiska lodowe lub roślinność wodną, gdy:

$h < 0,2$ m – 1 punkt pomiaru prędkości – na głęb. 0,4 h
 $0,2 < h < 0,6$ m – 3 punkty pomiaru prędkości – na głęb. 0,2 h ; 0,4 h ; 0,8 h
 $h > 0,6$ m – 5 punktów pomiaru prędkości – na głęb. 0,2 h ; 0,4 h ; 0,8 h oraz przy dnie i przy powierzchni

Tab. 4.1.4. Optymalna liczba pionów hydrometrycznych w metodzie młynkowej

Szerokość koryta	Liczba pionów
< 2 m	3
2–10 m	5
11–30 m	7–8
31–80 m	9–10
81–200 m	11–12
> 200 m	>15

Pomiary prędkości wody – przeprowadzone w ściśle określonych punktach w korycie cieku – stanowią podstawę do obliczeń natężenia przepływu. Najczęściej stosuje się **metodę rachunkową**, wykorzystującą wzór:

$$Q = F v_{sr} \quad (4.1.8)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 F – powierzchnia przekroju poprzecznego rzeki [m^2],
 v_{sr} – średnia prędkość wody w przekroju rzeki [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Podstawą obliczeń prędkości wody jest liczba obrotów skrzydełek młynka hydrometrycznego na sekundę. Średnią prędkość w pionie hydrometrycznym oblicza się stosując odpowiednie wzory – w zależności od liczby punktów pomiaru prędkości w pionie. Jeśli dokonano pomiaru tylko w 1 punkcie, korzysta się ze wzoru:

$$v_{sr} = \alpha + \beta n_{0,4h} \quad (4.1.9)$$

Jeśli dokonano pomiaru w trzech punktach, uwzględnia się wzór:

$$v_{sr} = \alpha + 0,25 \beta (n_{0,2h} + 2n_{0,4h} + n_{0,8h}) \quad (4.1.10)$$

natomiast jeśli dokonano pomiarów w pięciu punktach, wzór:

$$v_{sr} = \alpha + 0,1 \beta (n_d + 2n_{0,2h} + 3n_{0,4h} + 3n_{0,8h} + n_p) \quad (4.1.11)$$

gdzie:

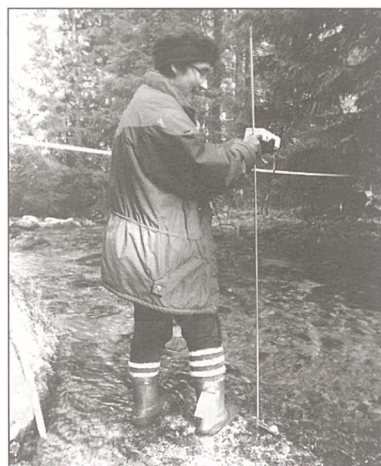
- v_{sr} – średnia prędkość w pionie,
 α, β – współczynniki tarowania młynka,
 n – liczba obrotów młynka na sekundę w danym pionie (indeks przy n – wskazuje, w jakiej odległości od dna został wykonany pomiar w pionie, gdzie głębokość wynosi h),
 n_d – liczba obrotów młynka na sekundę przy dnie,
 n_p – liczba obrotów młynka na sekundę przy powierzchni.

Po obliczeniu średniej prędkości wody w każdym pionie, oblicza się wielkość przepływu w poszczególnych częściach przekroju zawartych między pionami (ΔF). Dla skrajnych pionów przyjmuje się współczynnik redukcyjny średniej prędkości φ , którego wartość zależy od szorstkości zwilżonego obwodu brzegu w badanym profilu i zawiera się w przedziale 0,5–0,9. Objętość przepływu w całym przekroju rzeki jest sumą przepływów cząstkowych:

$$Q = \varphi v_1 \Delta F_0 + \Delta F_1 \frac{V_1 + V_2}{2} + \dots + \Delta F_{n-1} \frac{V_{n-1} + V_n}{2} + \varphi v_n \Delta F_n \quad (4.1.12)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],



Przygotowanie do pomiaru przepływu młynkiem hydrometrycznym

- φ – współczynnik redukcyjny dla skrajnych pól czynnego przekroju,
- $v_1; v_n$ – średnia prędkość w skrajnych pionach hydrometrycznych,
- $v_2; v_{n-1}$ – średnia prędkość w poszczególnych pionach,
- $\Delta F_0; \Delta F_n$ – powierzchnie czynnego przekroju koryta rzeki, ograniczone skrajnymi pionami i brzegami,
- $\Delta F_1; \Delta F_{n-1}$ – powierzchnie czynnego przekroju koryta rzeki zawarte między poszczególnymi pionami.

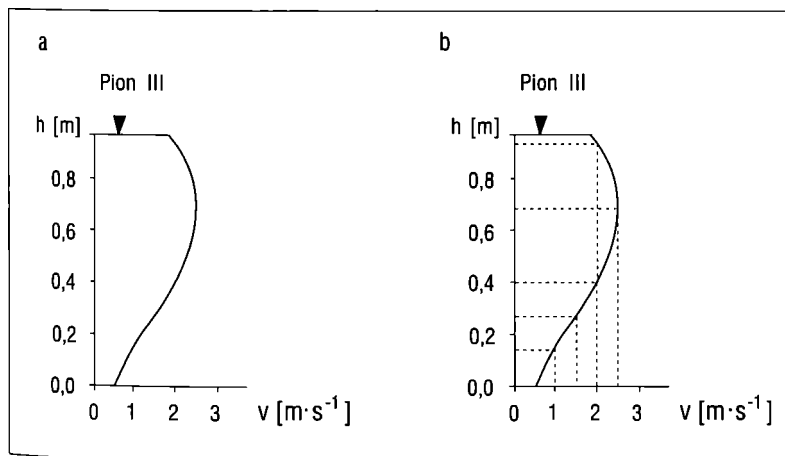
Wyniki pomiarów wykonanych młynkiem hydrometrycznym można wykorzystać w celu obliczenia natężenia przepływu **metoda Culmanna**, która wymaga wykreślenia profilu poprzecznego koryta rzeki i zaznaczenia rozkładu pionów hydrometrycznych. Kolejne etapy pracy to:

- wykreślenie tachoid,
- ustalenie głębokości, na których występują określone prędkości wody w poszczególnych pionach,
- wykreślenie izotach i pomiar powierzchni zawartych między nimi,
- obliczenie natężenia przepływu w całym przekroju koryta.

Tachoida jest to linia rozkładu prędkości w pionie hydrometrycznym. Aby ją wykreślić, należy w układzie współrzędnych prostokątnych zaznaczyć punkty odpowiadające zmierzonym prędkościom wody w pionach hydrometrycznych, a następnie połączyć je linią (ryc. 4.1.6a). (Uwaga: należy przyjąć taką samą podziałkę dla głębokości, jak przy wykreślaniu przekroju poprzecznego koryta). Przebieg tachoidy przy dnie i poniżej zwierciadła wody ekstrapoluje się zgodnie z tendencją przebiegu krzywej. Kształt tachoid – obrazujący rozkład prędkości wody w pionie – jest różny, w zależności od warunków przepływu. W korycie o regularnym kształcie, wyrównanym dnie, wolnym od roślinności, przy swobodnym zwierciadle wody, prędkość w pionie początkowo rośnie, a następnie maleje w kierunku dna.

W metodzie Culmanna, tachoida służy do ustalania głębokości, na których występują określone prędkości wody w poszczególnych pionach. W tym celu należy ustalić przedział dla wartości prędkości, np. co $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a następnie z tachoid odczytać głębokości, na których występują określone prędkości wody (ryc. 4.1.6b). Uzyskane wartości należy przenieść na profil poprzeczny koryta – tj. na poszczególne piony (ryc. 4.1.7).

Kolejnym etapem jest wykreślenie **izotach**. W tym celu należy połączyć punkty o jednakowej prędkości wody w przekroju poprzecznym koryta cieku (ryc. 4.1.8). Wyznaczanie linii przy powierzchni koryta przeprowadza się szacunkowo, zgodnie z ogólnym charakterem ich przebiegu. Następnie należy zmierzyć powierzchnie zawarte pomiędzy poszczególnymi izotachami.



Ryc. 4.1.6. Tachoida: a – konstrukcja krzywej, b – określanie głębokości o danych prędkościach wody

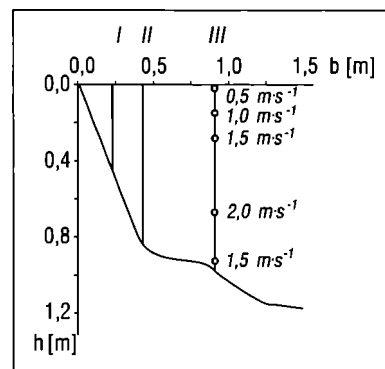
Natężenie przepływu oblicza się oddzielnie dla każdego pola ograniczonego kolejnymi izotachami według wzoru:

$$Q = F v \quad (4.1.13)$$

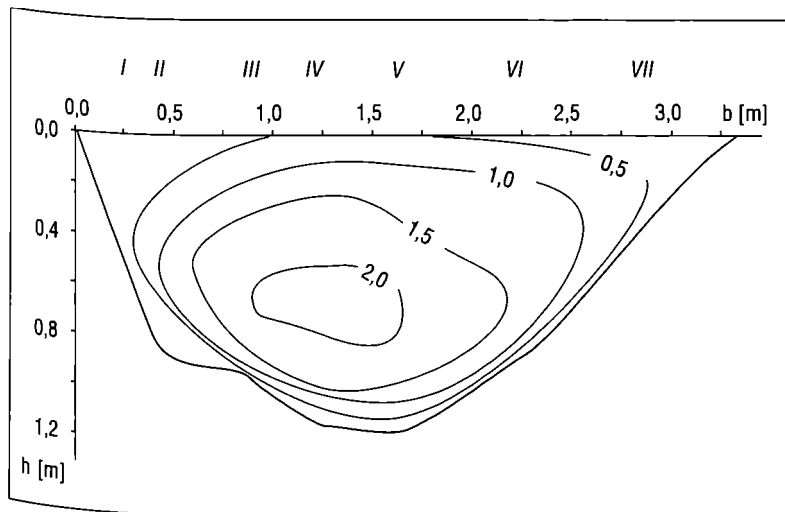
gdzie:

- Q – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- F – powierzchnia pomiędzy kolejnymi izotachami [m^2],
- v – średnia prędkość wody obliczona jako średnia arytmetyczna wartości kolejnych izotach [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Obliczenia wygodnie jest zestawzić w tabeli (tab. 4.1.5). Suma wszystkich powierzchni zawartych między izotachami daje wielkość powierzchni całego przekroju koryta rzeki, a suma przepływów cząstkowych w poszczególnych polach daje natężenie przepływu w całym przekroju poprzecznym koryta.



Ryc. 4.1.7. Zestawienie wartości prędkości wody w pionie hydrometrycznym



Ryc. 4.1.8. Konstrukcja izotach w przekroju poprzecznym koryta

Tab. 4.1.5. Obliczanie natężenia przepływu metodą Culmanna

v [m s ⁻¹]	v_{sr} [m s ⁻¹]	F (na wykresie) [cm ²]	F (w rzeczywistości) [m ²]	Q [m ³ s ⁻¹]
0,0–0,5	0,25			
0,5–1,0	0,75			
1,0–1,5	1,25			
1,5–2,0	1,75			
> 2,0	2,00			
Suma	*	*		

$$Q_c = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (4.1.14)$$

gdzie:

- Q_c – natężenie przepływu w przekroju poprzecznym koryta [m³·s⁻¹],
 Q_i – natężenie przepływu w polu ograniczonym kolejnymi izotachami [m³·s⁻¹].

Podobną do metody Culmanna jest **metoda Harlachera**, której pierwsze etapy pracy są analogiczne jak w poprzedniej. Należy sporządzić poprzeczny przekrój koryta rzeki, zaznaczyć piony hydrometryczne oraz wykreślić tachoidy. Kolejne etapy pracy to:

- obliczenie średniej prędkości wody w każdym pionie,
- wykreślenie linii średnich prędkości,
- wykreślenie krzywej iloczynów średniej prędkości i głębokości,
- obliczenie natężenia przepływu w całym przekroju koryta.

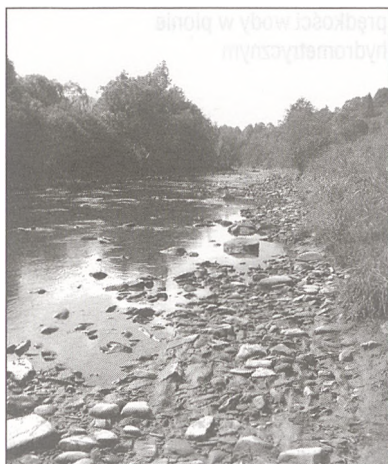
Średnią prędkość w pionie oblicza się w skali wykresu według wzoru:

$$v_{sr} = \frac{A}{h} \quad (4.1.15)$$

gdzie:

- v_{sr} – średnia prędkość w pionie [cm],
 A – pole figury ograniczonej tachoidą, zwierciadłem wody i osiami współrzędnych [cm²],
 h – głębokość w pionie hydrometrycznym [cm].

Następnie wykreśla się linię średnich prędkości. W tym celu – nad pionami hydrometrycznymi, zaznaczonymi w przekroju poprzecznym koryta rzeki – należy nanieść punkty odpowiadające wartości średniej prędkości (w skali wykresu) w danym pionie. Linia łącząca te punkty – to linia średnich prędkości w przekroju



Znajomość natężenia przepływu rzeki jest podstawą do obliczenia odpływu ze zlewni

koryta rzeki, z której można również odczytać średnią prędkość w dowolnie wyznaczonym pionie, w którym nie dokonywano pomiarów.

Konstrukcja krzywej iloczynów średniej prędkości i głębokości oparta jest na regule proporcjonalności boków w trójkątach podobnych. Dla danego wykresu przyjmuje się tzw. stałą Harlachera, czyli odcinek nie mniejszy niż największa wartość średniej prędkości w skali rysunku. Natężenie przepływu w przekroju poprzecznym koryta uzyskuje się mnożąc powierzchnię pola ograniczonego krzywą iloczynów średniej prędkości i głębokości oraz linią zwierciadła wody, podziałkę wykresu i stałą Harlachera. Jest to metoda dość pracochłonna i w praktyce rzadko stosowana.

Wyniki pomiarów i obliczeń w metodzie młynkowej wygodnie jest zestawiać w odpowiednich tabelach zbiorczych (tab. 4.1.6 lub 4.1.7).

